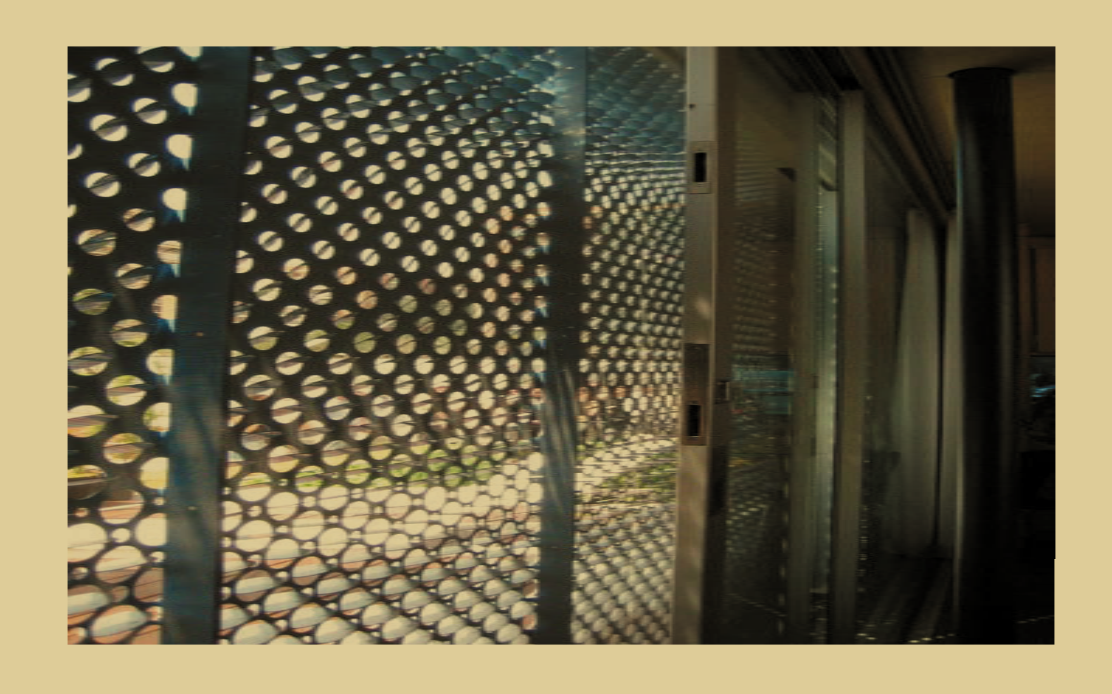
GUÍA PARA DETERMINAR LA ILUMINACIÓN NATURAL EXTERIOR E INTERIOR DE UN RECINTO

ILUMINACIÓN SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES Y VERTICALES EN MADRID

por

PILAR OTEIZA SANJOSÉ
ANA PÉREZ BURGOS



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-84-03

GUÍA PARA DETERMINAR LA ILUMINACIÓN NATURAL EXTERIOR E INTERIOR DE UN RECINTO

ILUMINACIÓN SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES Y VERTICALES EN MADRID

por

PILAR OTEIZA SANJOSÉ
ANA PÉREZ BURGOS

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-84-03

C U A D E R N O S
D E L I N S T I T U T O
J U A N D E H E R R E R A

NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
09 Ordinal de cuaderno (del autor)

TEMAS

1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN
0 VARIOS

Iluminación sobre superficies horizontales y verticales en Madrid.
Guía para determinar la iluminación natural exterior e interior de un recinto.

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestión y portada: Almudena Gil Sancho.
CUADERNO 369.01 / 2-84-03
ISBN-13: 978-84-9728-416-5
Depósito Legal: M-9397-2012

El objetivo de esta Guía es proporcionar valores horarios mensuales de iluminancia difusa e irradiancia global que han sido obtenidos mediante valores experimentales de un largo periodo de tiempo. Son de utilidad para hacer estimaciones de disponibilidad de luz natural y cálculos de ahorro de energía en edificaciones.

Se han utilizado datos experimentales de radiación solar global, difusa y directa, que fueron medidos, en superficies horizontales, en Madrid. Se ha empleado una serie de 26 años de datos (1980-2005) de la Agencia Estatal de Meteorología Española (AEMet). Con los valores de radiación solar, utilizando modelos empíricos de eficacia luminosa, debidamente probados para Madrid, se ha obtenido la iluminancia difusa.

Se ha analizado también la nubosidad, para caracterizar el tipo de cielo predominante en Madrid.

Las tablas, con los valores de iluminancia difusa horaria, calculada para superficies horizontales y verticales, representan el comportamiento luminoso en Madrid.

Se incluyen varios ejercicios prácticos que indican cómo se puede calcular la iluminación natural en el exterior y en el interior de un recinto.

Los valores de iluminancia que presentamos aquí, son exclusivamente los de la componente difusa; la iluminancia directa, deberá ser interceptada previamente si queremos iluminar un recinto de forma óptima. Cuando la iluminancia directa entra en un recinto puede producir deslumbramiento y desagradables contrastes en el campo visual. Un adecuado diseño de las aberturas, junto con el conocimiento de los niveles de luz natural incidentes en la ventana, permitirá ajustar la iluminación artificial a las necesidades reales del local y estaremos realizando arquitectura consciente y respetuosa con la premisa de ahorrar energía.

Agradecemos la colaboración de la arquitecta Marlix Pérez quien, con su activa participación, ha ayudado a elaborar esta Guía.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

Entre los objetivos que debe cumplir la arquitectura, está el aprovechamiento de los recursos naturales para crear espacios confortables e higiénicos, donde se puedan desarrollar, adecuadamente, las actividades humanas. La luz natural, proveniente del cielo y del sol, es un recurso indispensable para la creación de espacios de bienestar físico y psicológico. Es difícil de cuantificar y muy abundante en España. Además de iluminación, la luz del sol nos proporciona calor, que, en climas templados como el nuestro, es preciso evitar, en una gran parte del año.

Un mayor conocimiento de la luz natural y de las condiciones del cielo del lugar, permitirá racionalizar el uso de la energía eléctrica en el sector de la construcción y, consecuentemente, contribuirá con el ahorro de energía en las edificaciones. Además, se lograrán espacios confortables desde un punto de vista térmico y lumínico, si el diseño de los espacios interiores está apoyado en el conocimiento técnico de la radiación solar y de la iluminación natural.

Para dar continuidad a la línea de investigación iniciada en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSAM), referida al estudio de la iluminancia, la irradiancia y la eficacia luminosa de la radiación solar de Madrid, presentamos el año tipo de irradiancia global e iluminancia difusa, sobre superficies horizontales y verticales, orientadas Norte, Sur, Este y Oeste, que pueden ser útiles para el diseño de claraboyas, lucernarios y ventanas, de recintos en los que se ahorre energía eléctrica al usar la luz natural complementada con la artificial.

Para una valoración óptima de la disponibilidad de luz natural, es preciso contar con largas series de datos de iluminancia. Solamente analizando cada serie temporal es posible conocer, de forma fiable, el comportamiento de la iluminancia exterior, de una determinada localidad geográfica. Sin embargo, así como los registros mundiales de radiación solar son muy completos, los de iluminación son escasos; las series extensas de datos de iluminancia son inexistentes en la mayor parte del mundo. Por esta razón, cuando se necesitan datos de iluminancia se obtienen con modelos aplicados a la irradiancia y que han sido desarrollados durante los últimos años por diversos investigadores. En López et al (1) y Pérez-Burgos et al (2) se hace una revisión de algunos de estos modelos.

Las medidas de irradiancia se han transformado en iluminancia, utilizando la eficacia luminosa de la radiación solar, que es la relación entre la iluminancia y la irradiancia. Para el caso de la componente difusa sobre superficie horizontal, la eficacia está definida por la ecuación siguiente:

$$\mathbf{K}_{\mathbf{dh}} = \frac{\mathbf{L}_{\mathbf{dh}}}{\mathbf{E}_{\mathbf{dh}}} \qquad [1]$$

donde L_{dh} es la componente difusa de la iluminancia horizontal y E_{dh}, es la componente difusa de la irradiancia horizontal. La misma relación existe para las otras componentes de la radiación, pero este trabajo está dirigido exclusivamente a la componente difusa. De forma similar se define la eficacia luminosa sobre superficies verticales, sustituyendo la iluminancia y la irradiancia horizontales, por las verticales correspondientes.

La eficacia luminosa depende de la geometría solar y de las condiciones del cielo. Numerosos grupos de investigadores se han ocupado de calcular la eficacia luminosa de la radiación solar. En la bibliografía, se encuentran diversos estudios que proponen modelos de eficacia luminosa para las distintas componentes de la radiación. Específicamente, en Madrid, Oteiza y Soler (3) y Robledo y Soler (4, 5) han creado modelos para la eficacia luminosa de la radiación solar para superficies horizontales e inclinadas. Estos autores han realizado análisis completos de medidas de largos periodos de tiempo, de los que hay múltiples referencias en la literatura (6-8). La formulación de estos modelos está basada en ecuaciones empíricas en las que intervienen la altura solar y el índice de brillo del cielo como parámetros independientes. Cucumo et al (9) aplican el modelo de Robledo y Soler para superficies inclinadas para Arcavacata di Rende (Italia), pero usando coeficientes empíricos locales calculados para esa localidad. En estos trabajos se muestra que, la posibilidad de error es baja cuando se analizan conjuntamente todos los tipos de cielo, lo que está demostrado también en otros modelos analizados. Pérez-Burgos et al (2) validaron, con datos de Valladolid, una versión de este mismo modelo (10), para cielos despejados e iluminancia global.

En otras zonas geográficas, se han desarrollado otros modelos empíricos para calcular distintas componentes de la iluminancia (11-13). Estos modelos han sido analizados ampliamente en numerosos artículos y se han realizado destacados estudios comparativos (14-18). En Muneer (19) se puede encontrar una recopilación completa de trabajos concernientes a la iluminación natural.

El modelo de Perez (13), posiblemente el que tiene más referencias bibliográficas, ha sido validado en numerosos trabajos y está considerado como de alta precisión (20). Es el modelo que hemos tomado como referencia en este trabajo.

Teniendo en cuenta que, para el diseño edificaciones solares pasivas, es necesario conocer la cantidad de luz natural disponible, el objetivo principal de este trabajo ha sido obtener valores representativos de iluminancia exterior considerando series de datos correspondientes a largos periodos de tiempo. El trabajo está enfocado hacia la componente difusa de la iluminancia, por

ser la que permite iluminar equilibradamente un recinto. Se han utilizado medidas de irradiancia para calcular la iluminancia. Los datos experimentales de Madrid y de una amplia zona geográfica con características climáticas similares han servido de apoyo a este estudio (21-25). Se ha calculado la iluminancia a partir de la irradiancia usando el modelo de eficacia luminosa de Robledo y Soler, considerando el modelo de Perez, en sus diferentes formulaciones, para calcular la iluminancia difusa en superficies horizontales y verticales. Estos modelos se describen en los apartados siguientes.

2. DATOS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA

Los datos utilizados en este trabajo proceden de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet). Son medidas experimentales de radiación solar global y difusa sobre superficie horizontal y de radiación solar directa siguiendo al Sol, de la estación radiométrica de Madrid-Ciudad Universitaria, de coordenadas 40º 27' 10'' Norte y 3º 43' 27'' Oeste y 664 m de altitud. El periodo de datos que se ha utilizado para la realización de este trabajo ha sido de 26 años (1980-2005). Los datos son valores medios horarios. Para cada día, se dispone de datos de radiación solar de 5:00 h a 20:00 h, de forma que el valor de la irradiancia que corresponde a una hora determinada, es el promedio de la hora anterior. El tiempo, está expresado como Tiempo Solar Verdadero.

La agencia proporciona valores de radiación solar acumulados en una hora, expresados en decenas de kilojulios por metro cuadrado que hemos convertido en irradiancia expresada en vatios por metro cuadrado.

Ejercicio 1

Calcular la irradiancia recibida en Madrid el 17 de junio de 1992 de 11 a 12 (hora solar).

Datos de la Agencia Estatal de Meteorología:
Radiación global horizontal: 331 x 10 kJ/m^2 h (acumulado en la hora anterior).
Radiación directa siguiendo al sol: 239 x 10 kJm^2 h (acumulado en la hora anterior).
Radiación difusa horizontal: 105 x 10 kJ/m^2 h (acumulado en la hora anterior).

Solución:
Irradiancia global horizontal, E_{Gh} *:331 x 10 x 10^3 J/m^2 x 3600 s = 919,44 W/m^2*
Irradiancia directa, E_{Bn} *:239 x 10 x10^3 J/m^2 x 3600 s = 663,90 W/m^2*
Irradiancia difusa horizontal E_{dh} *:105 x 10 x 10^3 J/m^2 x 3600 s = 291,70 W/m^2*

Madrid tiene un clima Mediterráneo continental característico de la mayoría de las regiones interiores españolas. Es un clima Mediterráneo con un comportamiento continental debido a la escasa influencia del mar. Este tipo de clima se caracteriza por unas acusadas variaciones de la temperatura, diurnas y estacionales, así como, por una baja e irregular pluviosidad. Los inviernos continentales son fríos y los veranos son calurosos y sin nubosidad.

Debido a la amplia serie de datos analizados, se ha podido generar y tratar gran cantidad de otros datos que se describen a continuación. Los resultados estadísticos, obtenidos en este trabajo, representan el comportamiento típico de la irradiancia y de la iluminancia para las condiciones climáticas de Madrid. Como se hace habitualmente, los resultados se presentan en forma de tablas que muestran la disponibilidad de luz natural. La Tabla 1 muestra los valores horarios mensuales de irradiancia global sobre superficie horizontal, que representan el año tipo de Madrid. Como es natural, al mediodía se producen los máximos valores de irradiancia, variando desde 281 W/m^2 en Diciembre a 894 W/m^2 en Julio. En el Apéndice 1 se muestra la irradiancia difusa horaria mensual en superficie horizontal.

Tabla 1. Irradiancia global (W/m^2) media horaria mensual en superficie horizontal para el periodo 1980-2005, en Madrid.

Hora solar	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene					118	223	308	352	349	307	225	116				
Feb				73	196	316	407	457	460	413	324	201	74			
Mar			58	174	330	469	565	615	609	556	460	329	172	58		
Abr			118	274	429	567	660	703	700	634	544	414	265	114		
May		60	189	348	502	635	722	762	751	692	600	478	328	179	56	
Jun		91	248	420	583	720	818	869	854	799	701	563	397	236	86	
Jul		78	239	422	592	736	839	894	890	834	718	571	405	227	74	
Ago		48	163	342	518	670	778	830	830	761	646	500	327	155	45	
Sep			76	224	392	533	637	693	688	629	523	386	223	73		
Oct				102	232	354	446	494	495	445	354	234	103			
Nov				47	131	236	318	360	361	315	236	130	44			
Dic					84	173	247	280	281	245	177	82	0			

3. DETERMINACIÓN DE LA ILUMINANCIA DIFUSA HORIZONTAL

Se ha calculado la eficacia luminosa en un plano horizontal utilizando el modelo empírico de Robledo y Soler (4). Los datos experimentales, para la realización del modelo, fueron medidos en la ETSAM, de Junio 1994 a Noviembre 1995. Después de diversos ajustes estadísticos y

apoyándose en diferentes variables, proponen un modelo general simplificado que sirve para estimar la eficacia luminosa, usando como único parámetro el índice de brillo del cielo, Δ:

$$\mathbf{K_{dh} = 91{,}07 \cdot \Delta^{-0,254} = 91{,}07\left(\frac{E_{dh}}{E_0 sen\alpha}\right)^{-0,254}} \qquad [2]$$

siendo K_{dh} la eficacia luminosa de la radiación difusa en superficies horizontales con todo tipo de cielo, E_{dh} la irradiancia difusa sobre superficie horizontal ,E_0 la irradiancia extraterrestre (1.367 W/m^2) y α la altura solar media de la hora considerada.

La altura solar α, fig. 1, se calcula (26), mediante la expresión siguiente:

$$\mathbf{sen\alpha = sen\delta \cdot sen\phi + cos\delta \cdot cos\phi \cdot cos\omega = cos\, z} \qquad [3]$$

Donde δ, es la declinación[1], ϕ, es la latitud[2], ω, es el ángulo horario[3] y z es el ángulo cenital[4].

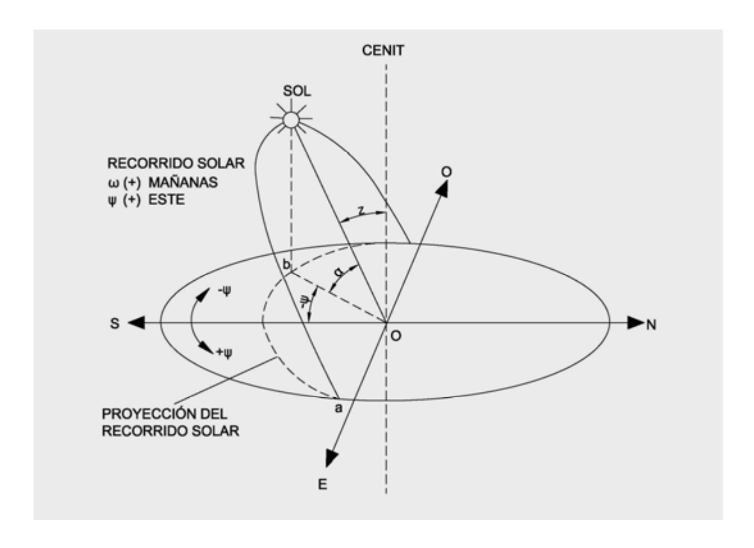


Figura 1. Representación de la altura solar α, el ángulo cenital z y el acimut solar Ψ.

Con la eficacia luminosa sobre superficie horizontal, K_{dh} , calculada para cada hora del periodo analizado y los datos de irradiancia difusa horizontal, E_{dh}, medidos por la AEMet, se ha determinado la iluminancia difusa horizontal, L_{dh}, utilizando la expresión siguiente:

$$\mathbf{L_{dh} = K_{dh} \cdot E_{dh}} \qquad [4]$$

[1] Declinación, δ, es el ángulo formado entre la línea que une los centros de la tierra y el sol, y el plano del ecuador terrestre.
[2] Latitud, ϕ, es el ángulo formado entre el lugar geográfico, el centro de la tierra y el ecuador.
[3] Ángulo horario, ω, es el formado entre el meridiano del observador y el meridiano del sol, contando desde el mediodía 15º cada hora, positivos por la mañana, negativos por la tarde y cero al mediodía.
[4] Ángulo cenital, z, es el complementario de la altura solar (90-z= α)

La iluminancia horaria calculada se ha comparado con las medidas del periodo 1992-1998, realizadas en la ETSAM (25). En la fig. 2, se muestran los resultados para los solsticios (Junio y Diciembre) y los equinoccios (Marzo y Septiembre). Para los demás meses, se han obtenido resultados muy similares. El ajuste entre ambas curvas, indica la alta precisión del modelo para la localización de Madrid.

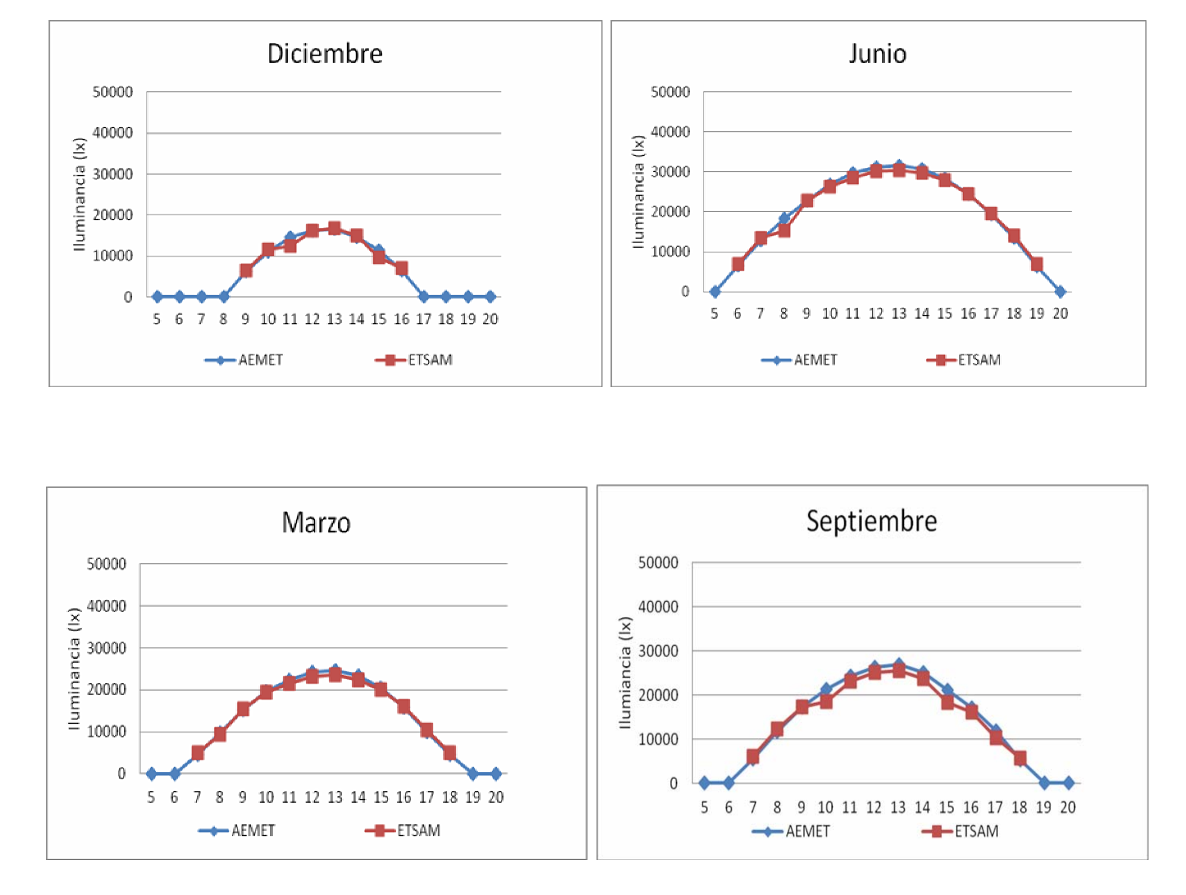


Figura 2. Iluminancia difusa horaria media, en una superficie horizontal, calculada (a partir de los datos de irradiancia de AEMet) y medida en la ETSAM, en el periodo 1992-1998.

Una vez que los resultados anteriores corroboraron la validez del modelo, se procedió a calcular los valores de iluminancia difusa horizontal, para todo el periodo 1980-2005. Los valores de iluminancia medios horarios mensuales, se muestran en la Tabla 2 y, gráficamente, en la fig. 3.

Evidentemente, al mediodía se producen los máximos de iluminancia difusa, variando desde 15.989 lux en Diciembre a 34.277 lux en Mayo.

Tabla 2. Iluminancia difusa (lux) media horaria mensual en superficie horizontal para el periodo 1980-2005.

Hora solar	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene					7426	11930	15363	16974	16747	15285	12172	7579				
Feb				5319	11160	16212	19789	21811	21942	20288	16502	11492	5446			
Mar			4442	10034	15814	20956	24354	26226	26553	24814	21533	16625	10388	4578		
Abr			7848	14588	20555	25347	29194	31193	31715	30103	26769	21872	15554	8149		
May		4914	11541	17898	23489	28438	31923	33736	34277	32549	29279	24725	18463	11682	4790	
Jun		6393	12493	17491	21737	25232	27331	29160	29943	29254	27047	23535	18522	13037	6410	
Jul		5549	11541	16285	19928	22532	24511	25804	25958	25290	23932	21182	17152	11763	5392	
Ago		3872	9246	14889	19086	22273	24646	26096	26235	25512	23453	20041	15057	9037	3641	
Sep			5300	11402	16721	20526	23355	25154	25383	24033	21116	16936	11561	5146		
Oct				6811	12599	17487	21234	22954	23070	21431	18024	13024	6922			
Nov				3713	8323	13032	16309	18137	18199	16630	13318	8548	3688			
Dic					6182	10895	14390	15960	15989	14201	11011	6358				

Figura 3. Iluminancia difusa (klux) media horaria mensual en superficie horizontal para el periodo 1980-2005.

Ejercicio 2

Calcular la Iluminancia difusa que recibió una superficie horizontal en Madrid, a las 11:30 h, el 17 de junio de 1992, conociendo las medidas de la irradiancia global, directa y difusa, sobre superficie horizontal.

En el Ejercicio1 hemos calculado la irradiancia, con los datos que se midieron en la estación:

Madrid, Estación: Ciudad Universitaria, Latitud: 40º 27' 10´´ Norte, Altitud: 664m

Irradiancia global horizontal: E_{Gh}: *919,44 W/m*^{2}
Irradiancia directa: E_{Bn}: *663,90 W/m*^{2}
Irradiancia difusa horizontal: E_{dh}: *291,70 W/m*^{2}

Solución:

1º) Determinamos, la eficacia luminosa:

$$K_{dh} = 91{,}07 \cdot \Delta^{-0,254} = 91{,}07\left(\frac{E_{dh}}{E_0 \operatorname{sen}\alpha}\right)^{-0,254}$$

siendo:

$$E_0 = 1367 \frac{W}{m^2}$$

$$E_{dh} = 291{,}70 \ W/m^2$$

Siendo:

α=71,83º

δ: 23,41º la declinación el 17 de junio (ver Tabla 1.3.1. Iqbal (26))

ϕ: 40,45º la latitud (40º 27')

ω: 7,5º el ángulo horario a las 11:30 h

z=18,17º el ángulo cenital (90-z =α)

Sustituyendo:

$$K_{dh} = 91{,}07 \cdot \Delta^{-0,254} = 91{,}07\left(\frac{291{,}70}{1367 \cdot 0{,}9501}\right)^{-0,254} = 91{,}07 \cdot 0{,}2246^{-0,254} = 133{,}08 \cdot lmW^{-1}$$

2º) Calculamos la iluminancia:

$$L_{dh} = K_{dh} \cdot E_{dh} = 133{,}08 \ lmW^{-1} \cdot 291{,}70 \ Wm^{-2}$$

$$L_{dh} = 38819{,}44 \ lmm^{-2} = 38819{,}44 \ lux$$

4. IRRADIANCIA E ILUMINANCIA HORIZONTAL Y TIPOS DE CIELO EN MADRID

La nubosidad del cielo de Madrid, se ha determinado mediante el análisis de la presencia de nubes en las medidas de irradiancia. Se han clasificado los tipos de cielo que ocurrieron en los 26 años analizados, en ocho categorías, mediante el índice de claridad del cielo, ε, debido a Pérez et al (13):

$$\varepsilon = \left\{\left[\left(\mathbf{E_{dh}} + \mathbf{E_{bn}}\right)/\,\mathbf{E_{dh}}\right] + 5.535 \cdot 10^{-6}\ \mathbf{Z}^{3}\right\}/\left(1 + 5.535 \cdot 10^{-6}\ \mathbf{Z}^{3}\right) \qquad [5]$$

siendo E_{dh} la irradiancia difusa horizontal, E_{Bn} la irradiancia directa y z el ángulo cenital, en grados.

El cielo, se ha clasificado dependiendo del valor de ε, desde la categoría 1 (cubierto) hasta la categoría 8 (totalmente despejado). En la fig. 4, se muestra el conjunto de los datos, repartidos según esta clasificación. Se observa que el cielo de categoría 6 es el más abundante en Madrid (21,3%). Los cielos totalmente despejados ocurren con una frecuencia relativamente alta (el 17,5% de los casos) y, si se consideran las categorías 6, 7 y 8 como las de cielos con tendencia a despejados, vemos que esos cielos ocurren el 53,4% del tiempo. Estos resultados son representativos de las condiciones del cielo en Madrid, pues se refieren a estadísticas de un periodo de 26 años.

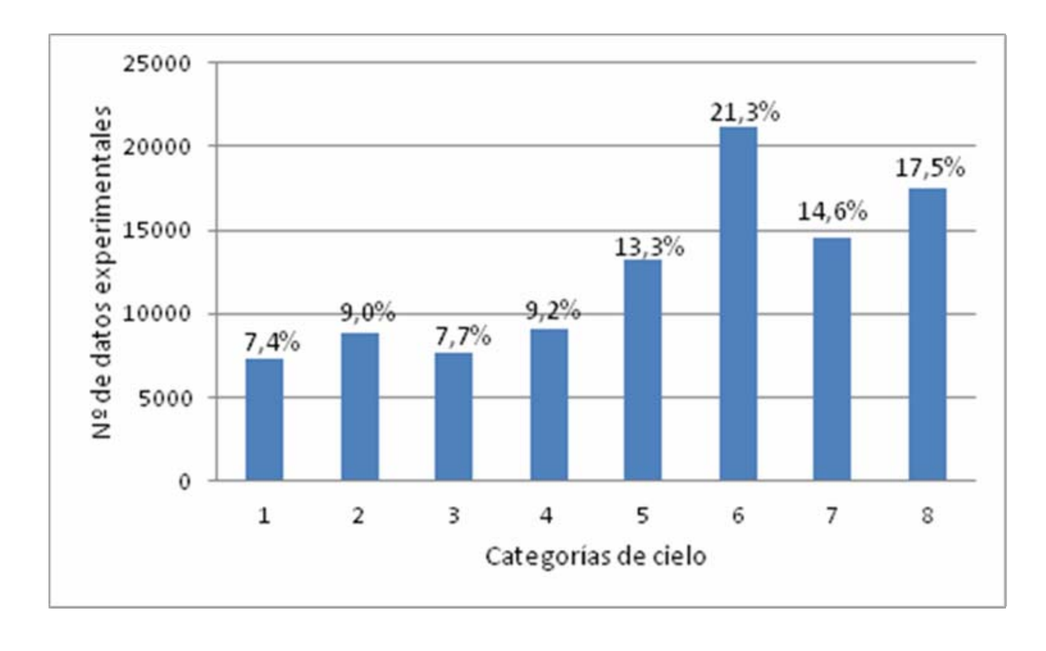


Figura 4. Número de datos experimentales por cada categoría de cielo, en el periodo 1980-2005 en Madrid.

La fig. 5 muestra los valores medios de irradiancia, global y difusa, según cada categoría de cielo. La forma de estas curvas es característica: mientras que la irradiancia global aumenta cuando disminuye la nubosidad, la componente difusa crece y luego disminuye, cuando la nubosidad disminuye también. La máxima irradiancia difusa, un valor de 184 W/m^2, se obtiene con cielos parcialmente cubiertos (categorías 3 y 4). Los valores de irradiancia global para las categorías extremas 1 y 8, son 146 W/m^2 y 675 W/m^2 respectivamente, y los valores de irradiancia difusa para estas categorías son 142 W/m^2 y 80 W/m^2, esto es, más bajos para los cielos totalmente despejados que para los totalmente cubiertos.

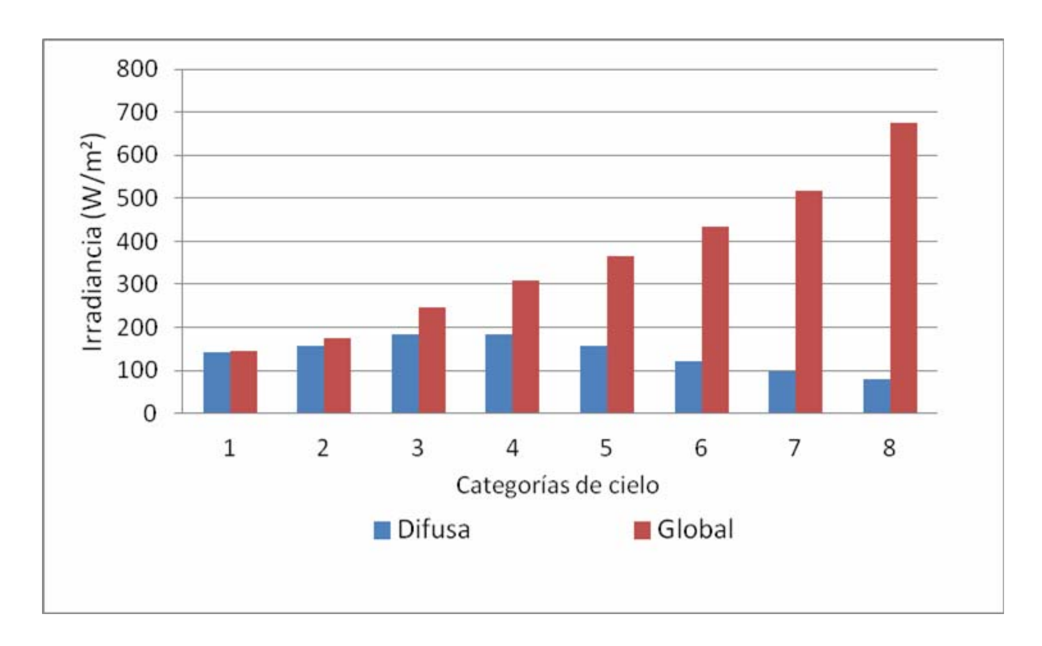


Figura 5. Irradiancia media horizontal, global y difusa, según categorías de cielo, en el periodo 1980-2005 en Madrid.

La fig.6 muestra la iluminancia media difusa para cada categoría de cielo. Como ocurría para la irradiancia, el valor más alto se corresponde con los cielos parcialmente cubiertos (categorías 3 y 4) seguidos por los cielos cubiertos. Los valores más bajos se obtienen con cielos despejados. El intervalo de variación está comprendido entre 13.460 lux y 22.820 lux.

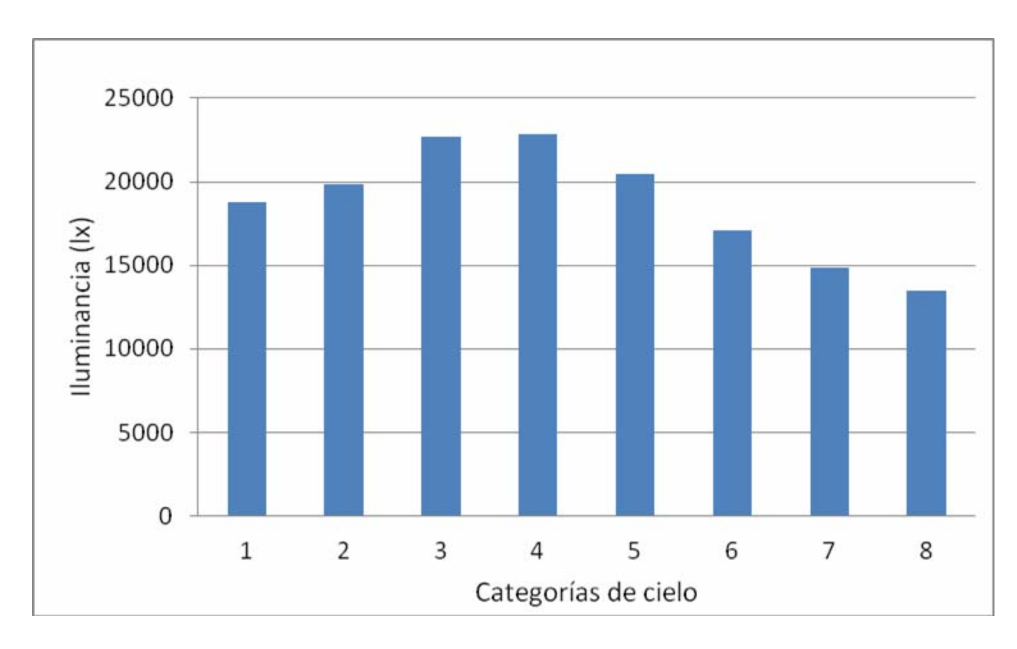


Figura 6. Iluminancia media horizontal difusa según categorías de cielo en el periodo 1980-2005 en Madrid.

5. DETERMINACIÓN DE LA ILUMINANCIA DIFUSA EN SUPERFICIES VERTICALES ORIENTADAS

Para obtener la iluminancia vertical a partir de la irradiancia, también se han utilizado modelos empíricos. En este caso, el proceso de cálculo se ha realizado siguiendo varias etapas. En primer lugar, se ha calculado la irradiancia vertical a partir de la horizontal; seguidamente, se ha obtenido la iluminancia vertical a partir de la irradiancia vertical.

5.1. Determinación de la irradiancia difusa en una superficie vertical

Para calcular la irradiancia vertical a partir de la horizontal, se ha utilizado el modelo de Perez. Los tres tipos de modelos desarrollados por Perez et al (13) sirven para calcular: a) la eficacia luminosa de la radiación solar horizontal global, difusa y directa, b) la irradiancia y la iluminancia difusas en superficies inclinadas y c) la luminacia del cielo. El modelo que se ha usado en este trabajo corresponde con el segundo tipo y está descrito en Perez et al (27). Una versión simplificada de este modelo está dada en Perez et al (28). Dicho modelo ha sido validado por numerosos autores: Robledo y Soler (5), De Rosa et al (17), Chirarattananon et al (6), Joshi et al (20), Janjai et al (7). La expresión del modelo simplificado de Perez es la siguiente:

$$\mathbf{E_{dTLT} = E_{dh}\left[(1-F_1)\cos^2\frac{TLT}{2} + F_1\frac{a_0}{a_1} + F_2 senTLT\right]} \qquad [6]$$

Esta ecuación considera la anisotropía del cielo con los coeficientes F_1 y F_2 que caracterizan la radiación próxima al disco solar y la cercana al horizonte, respectivamente. E_{dTLT} es la irradiancia difusa en una superficie inclinada con un ángulo TLT (TLT=90º si la superficie es vertical), E_{dh} es la irradiancia difusa en una superficie horizontal, F_1 y F_2 son coeficientes del brillo circunsolar y del horizonte respectivamente. Los coeficientes a_0 y a_1 están dados por:

$$\mathbf{a_0 = max[0, \cos INC] \qquad a_1 = max[\cos 85º, \cos Z]} \qquad [7]$$

donde INC es el ángulo de incidencia en la superficie inclinada y Z es el ángulo cenital. F_1 y F_2 dependen de parámetros que describen las condiciones del cielo y vienen dados por:

$$\mathbf{F_1 = max\left[0, \left\{F_{11} + F_{12}\Delta + F_{13}\left(\frac{\pi}{180}\right)Z\right\}\right]}$$
$$\mathbf{F_2 = F_{21} + F_{22}\Delta + F_{23}\left(\frac{\pi}{180}\right)Z} \qquad [8]$$

donde Z es el ángulo cenital y Δ es el índice de brillo del cielo. F_{ij} son los coeficientes empíricos obtenidos para cada categoría ε del índice de claridad del cielo, Perez et al (13).

Numerosos estudios han demostrado que la precisión del modelo de Perez se incrementa cuando se usan coeficientes locales (29, 6, 17). Robledo y Soler (29) han determinado los coeficientes empíricos F_{ij} para Madrid, basándose en medidas de irradiancia obtenidas en la ETSAM. Estos valores se muestran en la Tabla 3 y son los coeficientes que se han usado en este trabajo, pues están referidos a la misma localidad que nos ocupa.

Tabla 3. Coeficientes de irradiancia determinados para Madrid, para todos los planos verticales (29)

ε Categorías	Límite superior	Casos (%)	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1	1.065	15.3	-0.114	0.562	0.052	-0.041	0.081	-0.012
2	1.230	6.1	0.213	0.318	-0.123	0.110	-0.350	-0.003
3	1.500	6.0	0.617	-0.608	-0.151	0.191	-0.611	0.045
4	1.950	6.3	0.670	-0.225	-0.294	0.149	-0.231	-0.001
5	2.800	11.6	0.995	-1.123	-0.386	0.377	-0.959	-0.014
6	4.500	16.7	0.873	0.143	-0.568	0.425	-1.298	0.040
7	6.200	17.3	0.673	0.183	-0.491	0.290	-1.450	0.167
8	-	24.8	-0.065	5.540	-0.430	0.276	-0.799	0.044

El ángulo cenital z se determina mediante la expresión [3] y el ángulo de incidencia del sol sobre la superficie inclinada, INC, fig.7, se determina (26) con la ecuación siguiente:

$$\cos INC = -\cos\phi \cdot \cos\gamma \cdot sen\delta + sen\phi \cdot \cos\gamma \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot sen\gamma \cdot sen\omega \quad [9]$$

donde ϕ es la latitud, γ es el acimut de la superficie[5], δ es la declinación y ω es el ángulo horario.

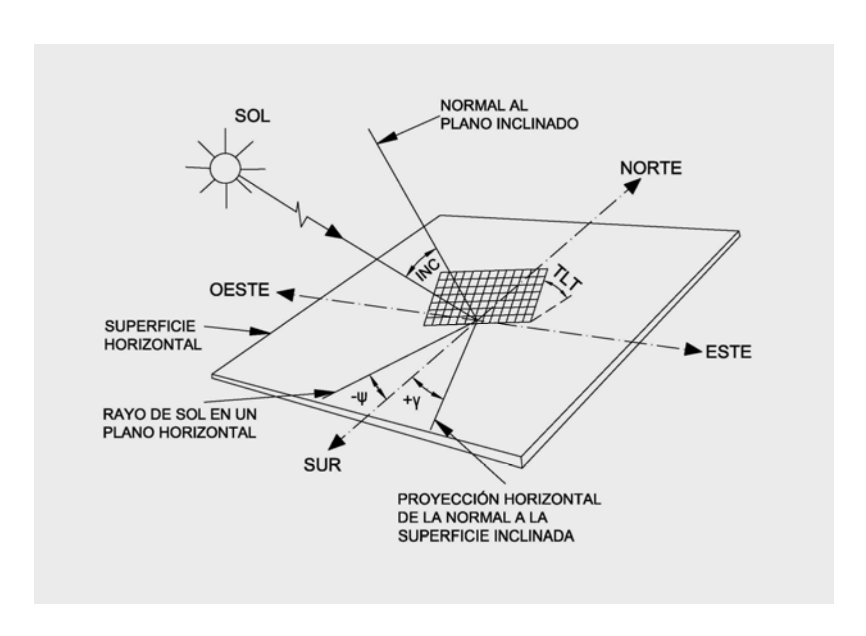


Figura 7. Posición del sol formando un ángulo INC con una superficie que está inclinada un ángulo TLT respecto al plano horizontal.

Ejercicio 3

Calcular la irradiancia difusa que recibió una superficie vertical en Madrid, a las 11:30 h, el 17 de junio de 1992, conociendo las medidas de la irradiancia global, directa y difusa, sobre superficie horizontal.

Datos:

Madrid, Estación: Ciudad Universitaria, Latitud: 40º 27’ 10´´ Norte, Altitud: 664m

Irradiancia global horizontal:	E_{Gh}: *919,44 W/m²*
Irradiancia directa:	E_{Bn}: *663,90 W/m²*
Irradiancia difusa horizontal:	E_{dh}: *291,70 W/m²*

Solución:

A partir de la irradiancia difusa horizontal, se calcula la irradiancia difusa para cualquier superficie inclinada un ángulo TLT:

[5] Acimut de la superficie γ, es el ángulo que forma la proyección horizontal de la normal a la superficie con el meridiano local, siendo: cero cuando la superficie está orientada al sur, positivo hacia el este y negativo hacia el oeste.

$$E_{dTLT}=E_{dh}\left[(1-F_1)\cos^2\frac{TLT}{2}+F_1\frac{a_0}{a_1}+F_2 senTLT\right]$$

Siendo:

a_0 = max [0, cos INC]

a_1= max [cos 85º, cos z]

$$\cos INC = -\cos\phi\cos\gamma sen\delta + sen\phi\cos\gamma\cos\delta\cos\omega + \cos\delta sen\gamma sen\omega$$

$$sen\alpha = sen\delta sen\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega = \cos z$$

Siendo:

INC: ángulo de incidencia del sol en la superficie

ϕ: 40,45º Latitud Madrid Ciudad Universitaria

γ: 180º (Norte) cos INC= -0,3443 INC=110º>90º no recibe sol

γ: 90º (Este) cos INC= 0,1198 INC=83,12º

γ: 0º (Sur) cos INC= 0,2880 INC=73,26º

γ: -90º (Oeste) cos INC= -0,1198 INC=96,88º>90º no recibe sol

δ: 23,41º (declinación el 17 de junio)

ω: +7,5º el ángulo horario de las 11:30h

α: 71,83º la altura solar a las 11:30 h el 17 de junio en Madrid

z= 18,17º =90-71,83º el ángulo cenital " " "

Sustituyendo tenemos:

$$\varepsilon=\left\{\left[(E_{dh}+E_{Bn})/E_{dh}\right]+5{,}535\times10^{-6}z^3\right\}/\left(1+5{,}535\times10^{-6}z^3\right)$$

$$\varepsilon=\left\{\left[(291{,}7+663{,}9)/291{,}7\right]+5{,}535\times10^{-6}18{,}17^3\right\}/\left(1+5{,}535\times10^{-6}18{,}17^3\right)=3{,}20$$

Con el valor de ε=3,20, escogemos, en la Tabla 3, los coeficientes F_{ij} tomando los valores de ε=3:

F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
0.617	-0.608	-0.151	0.191	-0.611	0.045

$$\Delta = \frac{E_{dh} m}{E_0} = \frac{E_{dh}}{E_0}\frac{1}{\text{sen}\alpha} = \frac{291{,}7}{1367}\frac{1}{\text{sen}71{,}83^o} = 0{,}2246$$

$$F_1 = \max\left[0, \left\{F_{11} + F_{12}\Delta + F_{13}\left(\frac{\pi}{180}\right)z\right\}\right]$$

$$F_{11} + F_{12}\Delta + F_{13}\frac{\pi}{180}z =$$

$$+0{,}617 - 0{,}608 \cdot 0{,}2246 - 0{,}151\frac{\pi}{180}18{,}17 = 0{,}433$$

$$F_1 = \max[0,\ 0{,}433] = 0{,}433$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22}\Delta + F_{23}\frac{\pi}{180}z$$

$$F_2 = 0{,}191 - 0{,}611 \cdot 0{,}2246 + 0{,}045\frac{\pi}{180}18{,}17 = 0{,}055$$

$$F_1 = 0{,}433 \qquad F_2 = 0{,}055$$

Irradiancia difusa sobre superficie vertical orientada al Norte $E_{dvNorte}$:

$$E_{dvNorte} = E_{dh}\left[(1 - F_1)\cos^2\frac{TLT}{2} + F_1\frac{a_0}{a_1} + F_2 \text{sen}TLT\right] =$$

$$= 291{,}7\left[(1 - 0{,}433)\cos^2\frac{90}{2} + 0{,}433\frac{0}{0{,}9501} + 0{,}055\text{sen}90\right] = 98{,}74\frac{W}{m^2}$$

a_0=max[0, cos INC]=max[0, -0,3443]=0

a_1=max[cos 85º, cos z]= max[cos 85º, cos 18,17º]=0,9501

Irradiancia difusa sobre superficie vertical orientada al Este E_{dvEste}:

$$E_{dvEste} = E_{dh}\left[(1 - F_1)\cos^2\frac{TLT}{2} + F_1\frac{a_0}{a_1} + F_2 \text{sen}TLT\right] =$$

$$= 291{,}7\left[(1 - 0{,}433)\cos^2\frac{90}{2} + 0{,}433\frac{0{,}1198}{0{,}9501} + 0{,}055\text{sen}90\right] = 114{,}76\frac{W}{m^2}$$

a_0= max[0, cos INC]=max[0, 0,1198]=0,1198

a_1= max[cos 85º, cos z]=max[cos 85º, cos 18,17º]=0,9501

Irradiancia Difusa sobre superficie vertical orientada al Sur E_{dvSur} :

$$\mathbf{E_{dvSur} = E_{dh}\left[(1-F_1)\cos^2\frac{TLT}{2} + F_1\frac{a_0}{a_1} + F_2 senTLT\right] =}$$

$$\mathbf{291{,}7\left[(1-0{,}433)\cos^2\frac{90}{2} + 0{,}433\frac{0{,}2880}{0{,}9501} + 0{,}055sen90\right] = 137{,}02\frac{W}{m^2}}$$

a_0 = max[0, cos INC]=max[0, 0,2880]=0,2880

a_1= max[cos 85º, cos z]=max[cos 85º, cos 18,17º]=0,9501

Irradiancia difusa sobre superficie vertical orientada al Oeste $E_{dvOeste}$:

$$\mathbf{E_{dvOeste} = E_{dh}\left[(1-F_1)\cos^2\frac{TLT}{2} + F_1\frac{a_0}{a_1} + F_2 senTLT\right] =}$$

$$\mathbf{= 291{,}7\left[(1-0{,}433)\cos^2\frac{90}{2} + 0{,}433\frac{0}{0{,}9501} + 0{,}055sen90\right] = 98{,}74\frac{W}{m^2}}$$

a_0 = max[0, cos INC]=max[0, -0,1198]=0

a_1= max[cos 85º, cos z]=max[cos 85º, cos 18,17º]=0,9501

Resumen de resultados:

Irradiancia difusa, a las 11:30 h del 17 junio de 1992 en Madrid	*Horizontal*	*Vertical Norte*	*Vertical Este*	*Vertical Sur*	*Vertical Oeste*
W/m^2	*291,70*	*98,74*	*114,76*	*137,02*	*98,74*

5.2. Determinación de la iluminancia difusa en una superficie vertical

Una vez obtenida la irradiancia difusa en una superficie vertical E_{dv}, (TLT=90º), se calcula la iluminancia difusa L_{dv} mediante la expresión siguiente:

$$\mathbf{L_{dv} = K_{dv} \cdot E_{dv}} \qquad [10]$$

donde K_{dv} es la eficacia luminosa en una superficie vertical. Para su estimación se ha utilizado el modelo de Robledo y Soler (5). Estos autores proponen un modelo que usa coeficientes locales calculados para Madrid. Siguiendo su trabajo, se plantea una ecuación distinta para cada orientación. Las expresiones empíricas para Norte, Sur, Este y Oeste, se muestran a continuación:

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}_{\text{dv Norte}} &= \mathbf{96.04(sen\alpha)^{-0.08}\,\Delta^{-0.039}} \\
\mathbf{K}_{\text{dv Sur}} &= \mathbf{108.0(sen\alpha)^{-0.088}\,\Delta^{-0.171}} \\
\mathbf{K}_{\text{dv Este}} &= \mathbf{112.2(sen\alpha)^{-0.061}\,\Delta^{-0.009}} \\
\mathbf{K}_{\text{dv Oeste}} &= \mathbf{112.63(sen\alpha)^{-0.0406}\,\Delta^{-0.027}}
\end{aligned} \qquad [11]$$

siendo α la altura solar y Δ el índice de brillo del cielo. Para determinar K_{dv} para orientaciones intermedias, los mismos autores recomiendan una interpolación entre los valores dados.

Siguiendo los pasos anteriores, se han obtenido los valores horarios de iluminancia vertical. Los resultados están basados en las medidas horarias de irradiancia registradas por la AEMet para el periodo 1980-2005. Las Tablas 4-7 muestran los valores mensuales medios horarios de iluminancia difusa, para las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste, respectivamente. Los valores diarios máximos, obtenidos al mediodía a lo largo del año, oscilan, para orientación Norte entre 10 y 6 klux y, entre 21 y 14 klux para orientación Sur. Estos valores diarios máximos varían entre 17 y 9 klux en el caso de orientaciones Este y Oeste, ocurriendo los picos por la mañana o por la tarde, respectivamente.

Tabla 4. Iluminancia difusa (lx) media horaria mensual en superficie vertical orientada al Norte, del periodo 1980-2005.

Hora solar	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene					3580	5271	6444	6933	6864	6389	5327	3562				
Feb				2667	4984	6678	7749	8304	8326	7887	6777	5074	2688			
Mar			2323	4636	6668	8159	8919	9255	9347	9028	8263	6878	4701	2323		
Abr			3991	6207	7970	9078	9704	9871	9995	9907	9404	8295	6412	4003		
May		4204	6123	7388	8768	9684	9961	9927	10030	10068	9800	8958	7413	6043	4079	
Jun		5247	7038	7770	8295	8697	8587	8436	8606	9010	9120	8704	7982	7153	5169	
Jul		4703	6600	7347	7894	8119	8013	7885	7832	8131	8413	8163	7511	6586	4507	
Ago		3410	5198	6599	7758	8273	8370	8348	8347	8579	8538	7916	6543	5011	3082	
Sep			2753	5241	7031	8017	8514	8767	8824	8673	8122	7072	5270	2659		
Oct				3294	5468	7049	8102	8527	8545	8137	7173	5581	3306			
Nov				1923	3834	5556	6636	7205	7209	6725	5632	3886	1836			
Dic					2937	4722	5939	6430	6435	5879	4776	2951				

Tabla 5. Iluminancia difusa (lx) media horaria mensual en superficie vertical orientada al Sur, del periodo 1980-2005.

Hora solar	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene					6721	10475	13276	14694	14509	13252	10594	6828				
Feb				4418	8849	12794	15868	17803	17985	16482	13157	9077	4468			
Mar			2519	6671	11056	15092	17910	19579	19870	18265	15512	11575	6854	2519		
Abr			4014	8197	12299	15917	18758	20287	20705	19264	16573	12900	8441	3975		
May		2401	5817	9018	12624	15880	18213	19431	19681	18429	16160	12918	8988	5669	2278	
Jun		3275	6684	9292	11704	13993	15337	16298	16670	16152	14663	12188	9402	6661	3179	
Jul		2873	6389	9010	11474	13386	14672	15397	15421	15025	13917	11796	9102	6288	2772	
Ago		1998	5124	8521	11836	14335	16130	17141	17171	16495	14711	12030	8414	4971	1888	
Sep			2927	7376	11520	14702	17161	18558	18792	17577	15066	11709	7441	2842		
Oct				5134	9544	13363	16704	18357	18371	16806	13843	9820	5241			
Nov				3409	7067	10929	13831	15408	15486	14059	11243	7359	3407			
Dic					5945	9635	12387	13773	13938	12413	9736	6189				

Tabla 6. Iluminancia difusa (lx) media horaria mensual en superficie vertical orientada al Este, del periodo 1980-2005.

Hora solar	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene					7340	8904	9252	8390	7525	6993	5807	3848				
Feb				7043	9724	11178	11281	10193	9186	8689	7434	5528	2887			
Mar			6904	10096	12409	13698	13172	11473	10346	9979	9110	7545	5113	2484		
Abr			9213	12737	14723	15502	14753	12450	11108	11001	10420	9156	7033	4054		
May		7857	11762	14513	16073	16697	15445	12677	11164	11194	10875	9910	8010	5480	2506	
Jun		8800	12262	14119	14922	14780	13057	10731	9520	9967	10079	9597	8211	6258	3360	
Jul		8230	11736	13678	14106	13357	11951	9836	8610	8940	9251	8965	7896	5882	2949	
Ago		7024	10543	13200	14094	13817	12571	10437	9194	9452	9398	8694	7105	4647	2052	
Sep			7772	11149	13101	13363	12609	10853	9733	9558	8930	7745	5732	2825		
Oct				7845	10480	11720	11903	10493	9427	8966	7878	6090	3563			
Nov				5526	7675	9335	9604	8756	7918	7375	6150	4206	1951			
Dic					6494	8138	8578	7791	7052	6427	5196	3176				

Tabla 7. Iluminancia difusa (lx) media horaria mensual en superficie vertical orientada al Oeste, del periodo 1980-2005.

Hora solar	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene					3866	5804	7166	7742	8446	9348	9128	7501				
Feb				2841	5471	7439	8701	9359	10462	11887	11682	10142	7136			
Mar			2456	5064	7424	9185	10103	10514	11917	13769	14481	13474	10741	7134		
Abr			4055	6885	8964	10297	11067	11286	13022	15623	16784	16248	13911	9567		
May		2614	5629	8120	9914	11033	11400	11386	13233	16142	17701	17496	15298	11914	7653	
Jun		3432	6286	8189	9379	9898	9810	9658	11383	14468	16423	16792	15275	12824	8676	
Jul		3050	6017	7901	8906	9218	9132	9006	10192	12815	14797	15431	14637	12042	7800	
Ago		2187	4837	7292	8728	9375	9527	9524	10821	13385	14839	15030	13406	10132	6334	
Sep			2911	5763	7857	9042	9655	9970	11287	13326	14155	13703	11494	7591		
Oct				3550	6038	7885	9128	9638	10775	12254	12437	11034	8150			
Nov				2023	4164	6142	7402	8069	8941	9938	9732	8080	5511			
Dic					3151	5181	6586	7161	7942	8644	8301	6789				

Ejercicio 4

Calcular la iluminancia difusa que recibieron las superficies verticales orientadas hacia los cuatro puntos cardinales, en Madrid, a las 11:30 h, el 17 de junio de 1992, conociendo las medidas de la irradiancia global, directa y difusa, sobre superficie horizontal.

Datos:

Madrid, Estación: Ciudad Universitaria, Latitud: 40º 27' 10´´ Norte, Altitud: 664m

Irradiancia global horizontal: $\mathbf{E_{Gh}}$: *919,44 W/m²*
Irradiancia directa: $\mathbf{E_{Bn}}$: *663,90 W/m²*
Irradiancia difusa horizontal: $\mathbf{E_{dh}}$: *291,70 W/m²*

Solución:

Se calcula, en primer lugar, la irradiancia difusa vertical E_{dv} *en las distintas orientaciones (que ya hemos obtenido en el Ejercicio 3) y, a continuación, se aplica la expresión siguiente:*

$$\mathbf{L_{dv} = K_{dv} \cdot E_{dv}}$$

donde K_{dv} *es la eficacia luminosa para las superficies verticales Norte, Sur, Este y Oeste, que se obtienen con las ecuaciones siguientes:*

$$\mathbf{K_{dv\ Norte} = 96.04(sen\alpha)^{-0.08}\,\Delta^{-0.039}}$$
$$\mathbf{K_{dv\ Sur} = 108.0(sen\alpha)^{-0.088}\,\Delta^{-0.171}}$$
$$\mathbf{K_{dv\ Este} = 112.2(sen\alpha)^{-0.061}\,\Delta^{-0.009}}$$
$$\mathbf{K_{dv\ Oeste} = 112.63(sen\alpha)^{-0.0406}\,\Delta^{-0.027}}$$

Siendo:

$$\alpha = 71{,}83^{o}$$

$$\Delta = \frac{\mathbf{E_{dh} m}}{\mathbf{E_0}} = \frac{\mathbf{E_{dh}}}{\mathbf{E_0}}\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{sen\alpha}} = \frac{\mathbf{291{,}7}}{\mathbf{1367}}\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{sen71{,}83^{o}}} = \mathbf{0{,}2246}$$

La altura solar α *y el índice de brillo del cielo* Δ*, se han calculado en los ejercicios anteriores.*

Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

	Vertical Norte	*Vertical Este*	*Vertical Sur*	*Vertical Oeste*
Eficacia luminosa, lm/W	*102,22*	*114,07*	*140,05*	*117,51*
Irradiancia, W/m^2	*98,74*	*114,76*	*137,02*	*98,74*
Iluminancia, lux	*10093,20*	*13090,67*	*19189,65*	*11602,93*

6. CÁLCULO DE LA ILUMINACIÓN INTERIOR

Entre los métodos que existen para calcular la iluminación interior de un recinto, se han seleccionado dos: el Método Lumen para la iluminación cenital, de la Sociedad Norteamericana de Ingenieros de Iluminación (IESNA) (30) y el Método Lynes, para la iluminación lateral, de la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) (31,32).

Ambos proporcionan valores medios absolutos de iluminancia interior y utilizan datos de entrada de fácil obtención, como son las dimensiones de los recintos, las de las ventanas y de los lucernarios, las transmitancias de los acristalamientos y las reflectancias de las superficies interiores. Los dos métodos requieren datos de iluminancia exterior que se han calculado en la primera parte de esta guía: ver Tabla 2, para iluminancia difusa horizontal y las Tablas 4, 5, 6 y 7 para la iluminancia vertical en los cuatro puntos cardinales.

6.1. Iluminación con aberturas cenitales

El método Lumen permite calcular la iluminación interior de un recinto iluminado mediante lucernarios y claraboyas dispuestos en la cubierta.

Se requieren cuatro pasos básicos:

1. Determinar la iluminancia exterior recibida cenitalmente.
2. Calcular la transmitancia neta del hueco, considerando la transmitancia del acristalamiento, así como la pérdida de luz que puede haber, dependiendo de la sencillez o complicación de los distintos controles solares que se utilicen.
3. Hallar un coeficiente de utilización que proporciona el porcentaje de iluminación interior en función de las reflectancias de la envolvente interior del recinto y de la cavidad donde se aloja el lucernario.
4. La iluminancia interior se calcula, finalmente, efectuando el producto de los valores obtenidos en los tres pasos anteriores.

La ecuación que permite obtener la iluminancia interior es la siguiente:

$$\mathbf{E_{int}} = \mathbf{E_{ext}} \left(\frac{\mathbf{N_{luc} A_{luc}}}{\mathbf{A_{total}}} \right) \cdot \mathbf{TN} \cdot \mathbf{CU} \qquad [12]$$

donde E_{int} es la iluminancia media en el plano de trabajo, E_{ext} es la iluminancia exterior difusa horizontal, N_{luc} es el número de lucernarios, A_{luc} es el área de cada lucernario, A_{total} es el área del plano de trabajo, TN es la transmitancia neta de cada lucernario y CU es el coeficiente de utilización.

El coeficiente de utilización del recinto, CU, se obtiene entrando en la Tabla 8, habiendo calculado previamente el coeficiente de la cavidad, RCR, y conociendo las reflectancias del techo y de las paredes.

El coeficiente de la cavidad, RCR, representa la relación que existe entre las dimensiones L, longitud y w, anchura del plano de trabajo y la distancia desde el lucernario hasta el plano de trabajo, h_c, fig. 8:

$$\mathbf{RCR} = \frac{\mathbf{5h_c (L + w)}}{\mathbf{L \cdot w}} \qquad [13]$$

La transmitancia neta TN, depende a su vez de varios factores y se calcula mediante el producto de todos ellos:

$$\mathbf{TN} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{N_w} \cdot \mathbf{R_a} \cdot \mathbf{T_C} \cdot \mathbf{F_S} \qquad [14]$$

donde T es la transmitancia del acristalamiento, N_w es la eficiencia de la cavidad, R_a es el cociente entre el área neta y el área total del lucernario, T_c es la transmitancia de los controles solares y F_s es el factor de pérdida de luz por suciedad.

La eficiencia de la cavidad N_w depende a su vez de dos factores:

a) del índice de la cavidad WI, que relaciona las tres dimensiones del prisma de captación de luz, fig. 8, siendo a, y b las dimensiones de la base y c, la altura:

$$\mathbf{WI} = \frac{\mathbf{5c(a + b)}}{\mathbf{a \cdot b}} \qquad [15]$$

b) y de las reflectancias de las paredes de la cavidad, fig. 9.

El factor F_S que indica la reducción de luz por suciedad (acumulada por falta de mantenimiento), depende de la posición del acristalamiento, y viene dado en la Tabla 9.

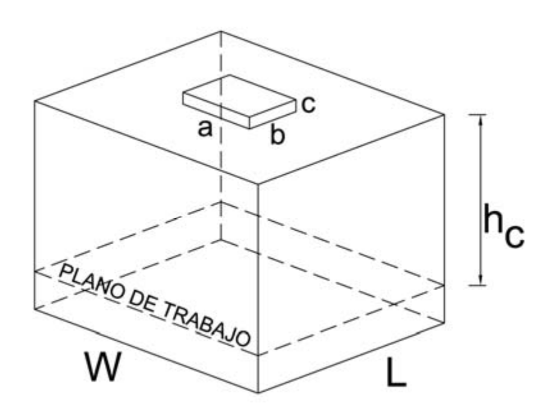


Figura 8. Dimensiones del recinto y del lucernario que lo ilumina.

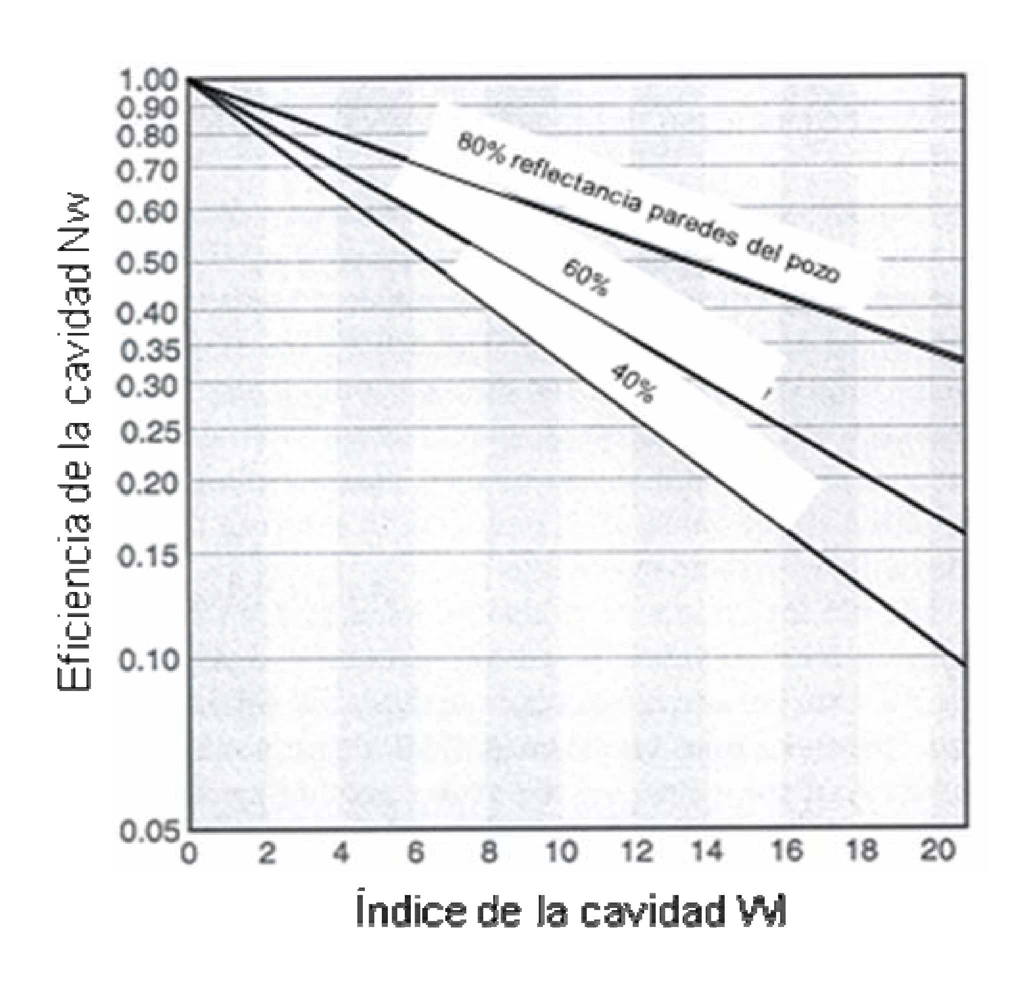


Figura 9.- Eficiencia de la cavidad del lucernario (N_w)

Tabla 8.- Coeficiente de utilización del recinto CU
(para una reflectancia del suelo de 20%).

Reflectancia del techo (%)	RCR*	Reflectancia de las paredes (%)		
		50	30	10
80	0	1,19	1,19	1,19
	1	1,05	1,00	0,97
	2	0,93	0,86	0,81
	3	0,83	0,76	0,70
	4	0,75	0,67	0,60
	5	0,67	0,59	0,53
	6	0,62	0,53	0,47
	7	0,57	0,49	0,43
	8	0,54	0,47	0,41
	9	0,53	0,46	0,41
	10	0,52	0,45	0,40
50	0	1,11	1,11	1,11
	1	0,98	0,95	0,92
	2	0,87	0,83	0,78
	3	0,79	0,73	0,68
	4	0,71	0,64	0,59
	5	0,64	0,57	0,52
	6	0,59	0,52	0,47
	7	0,55	0,48	0,43
	8	0,52	0,46	0,41
	9	0,51	0,45	0,40
	10	0,50	0,44	0,40
20	0	1,04	1,04	1,04
	1	0,92	0,90	0,88
	2	0,83	0,79	0,76
	3	0,75	0,70	0,66
	4	0,68	0,62	0,58
	5	0,61	0,56	0,51
	6	0,57	0,51	0,46
	7	0,53	0,47	0,43
	8	0,51	0,45	0,41
	9	0,50	0,44	0,40
	10	0,49	0,44	0,40

*RCR coeficiente de la cavidad, que se obtiene con la ecuación [13]

Tabla 9.- Factor de reducción por suciedad en función de la posición del acristalamiento (F_S)

Localización	Verticales	Inclinados	Horizontales
Áreas Limpias	0,9	0,8	0,7
Áreas Industriales	0,8	0,7	0,6
Áreas muy Sucias	0,7	0,6	0,5

Ejercicio 5

Calcular la iluminancia interior que proporcionan los lucernarios de una nave industrial, situada en Madrid, durante todas las horas de un día de diciembre.

Datos:

Las dimensiones de la nave son: 9 m de altura y 20 x 40 m de planta.
El plano de trabajo está situado a 90 cm del suelo.
En proyecto se plantean 24 lucernarios con un material de transmitancia a la iluminancia difusa de 80 % (fig.10).
Cada lucernario está colocado sobre una cavidad de 1 m de altura y 2 x 2,5 m de planta.
Considere que el 5% del lucernario está ocupado por perfiles y marcos de sujeción.
Las superficies de la nave tienen las reflectancias siguientes: techo 80 %, paredes 50 %, y suelo 20 %.
Las paredes de la cavidad del lucernario tienen una reflectancia del 40 %.

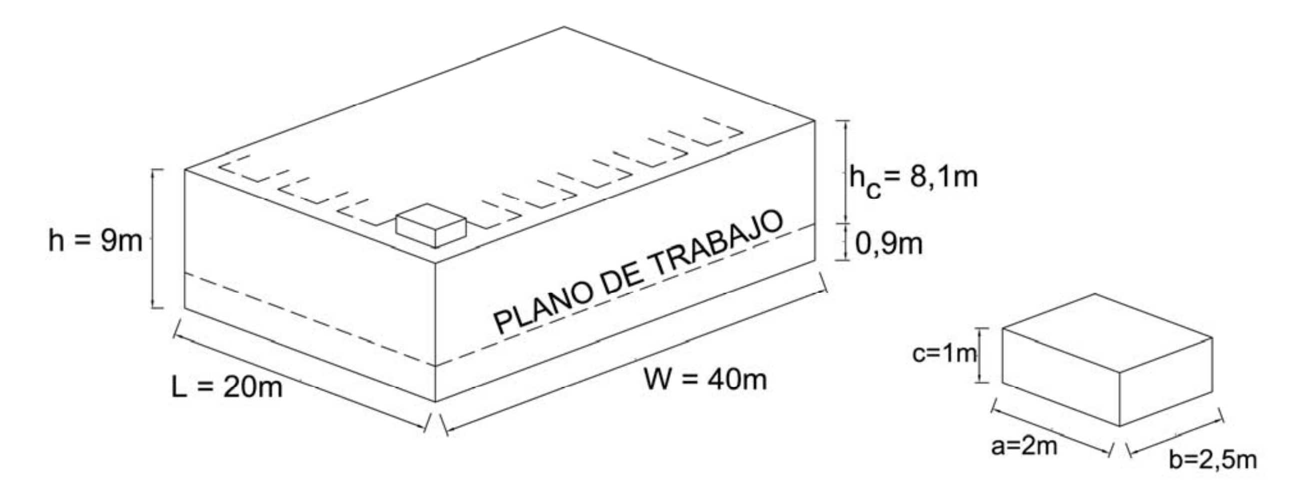


Figura 10. Dimensiones de la nave industrial y del lucernario tipo.

Solución:

$$\mathbf{E_{int}} = \mathbf{E_{ext}}\left(\frac{\mathbf{N_{luc}A_{luc}}}{\mathbf{A_{total}}}\right)\cdot \mathbf{TN}\cdot \mathbf{CU}$$

Los valores de E_{ext}, Iluminancia exterior difusa (lx) en superficie horizontal, en el mes de Diciembre, en Madrid (obtenidos de la Tabla 2) son los siguientes:

Iluminancia exterior difusa horaria en Diciembre, en Madrid (lx)

Hora solar	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Dic				6182	10895	14390	15960	15989	14201	11011	6358			

N_{luc} = 24
A_{luc} = a x b= 2,0 m x 2,5 m= 5 m^2
A_{total} = L x w= 20 m x 40 m= 800 m^2

El coeficiente de utilización del recinto, CU, se obtiene calculando el coeficiente de la cavidad, RCR, y entrando con él en la Tabla 8.

$$\mathbf{RCR = \frac{5h_c(L+w)}{L \cdot w} = \frac{5 \cdot 8{,}1(20+40)}{20 \cdot 40} = 3{,}0375 \approx 3}$$

Con RCR=3 y la reflectancia del techo: 80% y de las paredes: 50% en la Tabla 8, se obtiene el coeficiente de utilización CU=0,83.

La transmitancia neta TN, se calcula efectuando el siguiente producto:

$$\mathbf{TN = T \cdot N_w \cdot R_a \cdot T_C \cdot F_S}$$

T=0,80
N_w es la eficiencia de la cavidad
R_a =0,95/1=0,95
T_c =1 (no hay controles solares)
F_s =0,60 (Tabla 9: Acristalamiento horizontal en un área industrial)

La eficiencia de la cavidad N_w se obtiene con el índice de la cavidad WI:

$$\mathbf{WI = \frac{5c(a+b)}{a \cdot b} = \frac{5 \cdot 1 \cdot (2+2{,}5)}{2 \cdot 2{,}5} = 4{,}50}$$

En la fig. 9, con el WI=4,50 y las reflectancias de las paredes de la cavidad, 40%, se obtiene la eficiencia de la cavidad, N_w :

N_w = 0,60

$$\mathbf{TN = T \cdot N_w \cdot R_a \cdot T_C \cdot F_S = 0{,}80 \cdot 0{,}60 \cdot 0{,}95 \cdot 1 \cdot 0{,}60 = 0{,}2736 \approx 0{,}27}$$

La iluminancia interior se obtendrá sustituyendo los valores anteriores en la siguiente expresión:

$$\mathbf{E_{int} = E_{ext}\left(\frac{N_{luc}A_{luc}}{A_{total}}\right) \cdot TN \cdot CU = E_{ext}\left(\frac{24 \cdot 5}{800}\right) \cdot 0{,}27 \cdot 0{,}83 = E_{ext} \cdot 0{,}034}$$

Así, E_{int} la iluminancia interior, en el plano de trabajo de la nave industrial, a las 12 h (hora solar) del mes de diciembre será:

$$E_{int} == E_{ext} \cdot 0{,}034 = 15960 \cdot 0{,}034 = 542{,}64 \approx 543 \ \ lx$$

Para el total del día de diciembre, los valores de Iluminancia interior (lx),son los siguientes

Iluminancia interior media horaria en Diciembre, en la nave industrial (lx)

Hora solar	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*	*18*	*19*
Dic				*210*	*370*	*489*	*543*	*544*	*486*	*374*	*216*			

6.2. Iluminación con aberturas laterales

El Método Lynes permite calcular la iluminación de un recinto que recibe luz natural de ventanas verticales. La ecuación es la siguiente:

$$E_{int} = \frac{E_{Vert} \cdot V \cdot \tau}{A(1 - R_m)} \qquad [16]$$

donde E_{int} es la iuminancia interior media, E_{Vert} la iluminancia vertical exterior, V el área de la ventana, τ la transmitancia del vidrio, A el área de las superficies interiores y R_m la reflectancia media, que se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i . R_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \qquad [17]$$

Debiéndose cumplir:

$$\left(\frac{L}{w} + \frac{L}{h}\right) \leq \frac{2}{1 - R_b} \qquad [18]$$

Donde **L** es la profundidad, **w** es la anchura, **h** es la altura del dintel de la ventana sobre el suelo, fig. 11, y $\mathbf{R_b}$ es la reflectancia media de la mitad más alejada de la ventana.

La expresión [18] se puede utilizar también para determinar la profundidad máxima que puede tener un recinto que vaya a ser iluminado lateralmente. Si L excede ese valor, la mitad interior estará muy oscura.

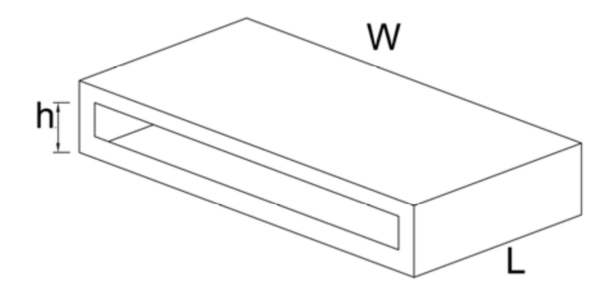


Figura 11. Dimensiones w, L y h en un recinto con ventana.

Ejercicio 6

Calcular la iluminancia interior media de un aula (fig. 12) situada en Madrid, cuyas ventanas están orientadas al norte. La transmitancia del vidrio es del 70% y las reflectancias medias de las superficies son las siguientes: suelo 42 %, techo 78 %, paredes blancas 78 %, pizarra 12 %, pared negra (donde está la pizarra) 7 %, tarima 17 % y mesas 76 %.

Solución:

$$\mathbf{E_{int}} = \frac{\mathbf{E_{Vert} \cdot V \cdot \tau}}{\mathbf{A(1 - R_m)}}$$

E_{vert}, Iluminancia exterior vertical difusa (lx) en superficie orientada al norte, en el mes de Diciembre, en Madrid, se obtiene de la Tabla 4:

Iluminancia exterior difusa vertical norte, en Diciembre, en Madrid (lx)

Hora solar	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*	*18*	*19*
Dic				*2937*	*4722*	*5939*	*6430*	*6435*	*5879*	*4776*	*2951*			

V, Área de las ventanas:

$$V = 2{,}10 \times 2{,}30 \times 5 = \mathbf{24{,}15\ m^2}$$

τ, Transmitancia del vidrio:

$$\tau = \mathbf{0{,}70}$$

A, Area de las superficies interiores:

A_{suelo}= 16,50 x 6,70= 110,55 m^2
A_{techo}=16,50 x 6,70= 110,55 m^2
$A_{paredes}$= 2x 16,50 x 3,70 + 2 x 6,70 x 3,70= 122,10 + 49,58 =171,68 m^2

$$A_{TOTAL} = 110{,}55 + 110{,}55 + 171{,}68 = \mathbf{392{,}78\ m^2}$$

R_m, Reflectancia media:

$$\mathbf{R_m} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mathbf{A_i . R_i}}{\sum_{i=1}^{n} \mathbf{A_i}}$$

$A_{pizarra}$=6,70 x 1,20 = 8,04 m^2, $R_{pizarra}$= 0,12

A_{tarima}=2,40 x 6,70 =16,08 m^2, R_{tarima}= 0,17

$A_{mesa\ 1}$=3,30 x 0,75 x 8 = 19,80 m^2, R_{mesa}= 0,76

$A_{mesa\ 2}$=2,20 x 0,75 x 6 = 9,90 m^2, R_{mesa}= 0,76

$A_{suelo\ libre}$= A_{suelo} - A_{mesas} - A_{tarima}=110,55 –19,80 – 9,90 – 16,08 = 64,77 m^2, R_{suelo}= 0,42

$A_{pared\ negra}$= 6,70 x 3,70 – $A_{pizarra}$=24,79 – (6,70 x 1,20)= 24,79 – 8,04= 16,75 m^2

$R_{pared\ negra}$= 0,07

$A_{superficie\ blanca}$= A_{techo}+ $A_{paredes}$ – $A_{pizarra}$ – $A_{ventanas}$ – $A_{pared\ negra}$ =
= 110,55 + 171,68 – 8,04 – 24,15 – 16,75= 233,29 m^2

$R_{superficie\ blanca}$= 0,78

$$\mathbf{R_m} = \frac{\mathbf{8{,}04 \cdot 0{,}12 + 16{,}08 \cdot 0{,}17 + 29{,}70 \cdot 0{,}76 + 64{,}77 \cdot 0{,}42 + 16{,}75 \cdot 0{,}07 + 233{,}29 \cdot 0{,}78}}{\mathbf{8{,}04 + 16{,}08 + 29{,}70 + 64{,}77 + 16{,}75 + 233{,}29}} =$$

$$= \frac{\mathbf{236{,}77}}{\mathbf{368{,}33}} = \mathbf{0{,}6428}$$

La iluminancia media del aula, a las 12 horas, del mes de diciembre:

$$\mathbf{E_{int}} = \frac{\mathbf{E_{Vert} \cdot V \cdot \tau}}{\mathbf{A(1 - R_m)}} = \frac{\mathbf{6430 \cdot 24{,}15 \cdot 0{,}70}}{\mathbf{392{,}78\ (1 - 0{,}6428)}} = \frac{\mathbf{108699{,}15}}{\mathbf{140{,}30}} = \mathbf{774{,}76}\ \text{lx}$$

Verfiquemos si la mitad interior del aula cumple la siguiente condición:

$$\left(\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{w}}+\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{h}}\right)\leq\frac{\mathbf{2}}{\mathbf{1-R_b}}$$

$$\left(\frac{\mathbf{6{,}70}}{\mathbf{16{,}50}}+\frac{\mathbf{6{,}70}}{\mathbf{3{,}30}}\right)\leq\frac{\mathbf{2}}{\mathbf{1-0{,}6428}}$$

$$\mathbf{2{,}436\leq 5{,}599}$$

Se verifica la expresión, por lo tanto podemos asegurar que la mitad del aula, alejada de las ventanas, estará bien iluminada.

En la tabla siguiente se dan los valores de iluminancia interior media para todas las horas de un día de Diciembre.

Iluminancia interior media en el aula (lx)

Hora solar	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*	*18*	*19*
Dic				*354*	*569*	*716*	*775*	*775*	*708*	*575*	*356*			

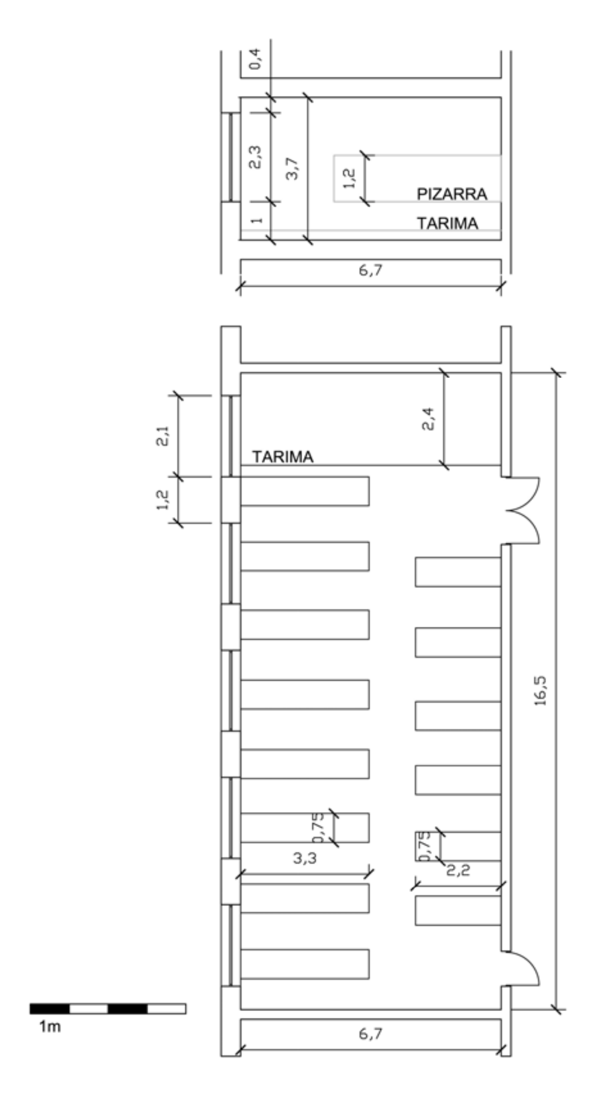


Figura 12. Sección y planta del aula de clase del ejercicio 6.

7. CONCLUSIONES

La luz natural determina y configura los recintos en donde realizamos nuestras actividades cotidianas; por ello, el diseño arquitectónico está estrechamente ligado con el conocimiento técnico de la iluminación natural (33,34). Para poder integrar la iluminación diurna en los proyectos de arquitectura, es necesario conocer la cantidad de luz natural del lugar de emplazamiento. De acuerdo con esto, el objetivo principal de este trabajo ha sido proporcionar una base de datos de iluminación, representativa del clima luminoso de Madrid. Se presentan tablas y figuras de irradiancia global en superficie horizontal e iluminancia difusa, en superficie horizontal y en cuatro superficies verticales, orientadas hacia los cuatro puntos cardinales. Los resultados están basados en datos experimentales -recogidos en Madrid durante un periodo de 26 años- y en modelos que han sido suficientemente validados en la literatura científica. Como se han usado largas series de datos experimentales, los promedios presentados en esta guía representan el año tipo de iluminancia difusa y pueden ser de utilidad para arquitectos, y otros técnicos. Siempre y cuando estén involucrados en el diseño de la iluminación de espacios interiores basándose en datos técnicos reales haciendo posible el ahorro de energía eléctrica.

8. REFERENCIAS

(1) López, G., Gueymard, C. A.: “Clear-sky solar luminous efficacy determination using artificial neural networks”. *Solar Energy*, Vol. 81 (2007), pp. 929-939. doi: 10.1016/solener.2006.11.001.

(2) Pérez-Burgos, A., Bilbao, J., De Miguel, A.: “An evaluation of illuminance measurements at Valladolid (Spain)”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,* Vol. 69 nº 8 (2007), pp. 939-946. doi: 10.1016/j.jasp.2007.02.005.

(3) Oteiza, P., Soler, A.: “Eficacia luminosa de la radiación solar global, difusa y directa para cielos despejados en superficies horizontales”. *Libro de Actas del VII Congreso Ibérico de Energía Solar*, International Solar Energy Society, (1994), pp. 189-194.

(4) Robledo, L., Soler, A.: “On the luminous efficacy of diffuse solar radiation”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, Issue 10 (2001), pp. 1181-1190. doi: 10.1016/SO196-8904(00)00132-1.

(5) Robledo, L., Soler, A.: “Modeling the luminous efficacy of diffuse solar radiation on inclined surfaces for all sky conditions”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, (2003), pp.177-189. doi: 10.1016/SO196-8904(01)00202-3.

(6) Chirarattananon, S., Rukkwansuk, P., Chaiwiwatworakul, P., Pakdeepol, P.: “Evaluation of vertical illuminance and irradiance models against data from north Bangkok”. *Building and Environment*, Vol. 42 nº 11 (2007), pp. 3894-3904. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11-0121.

(7) Janjai, S., Wattan, R., Nunez, M.: “A stadistical approach for estimating diffuse illuminance on vertical surfaces”. *Building and Environment*, Vol. 44 nº 10 (2009), pp.2097-2105. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.02.018.

(8) Fakra, A.H., Boyer, H., Miranville, F., Bigot, D.: "A simple evaluation of global and diffuse luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate", *Renewable Energy* Vol. 36 nº 1 (2011), pp. 298-306. doi: 10.1016/j.renene.2010.06.042.

(9) Cucumo, M. A., De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., Marinelli, V.: "Predicting diffuse illuminance on vertical surfaces at Arcavacata di Rende (Italy) for various types of sky", *Building and Environment*, Vol. 43 nº10 (2008), pp. 1678-1686.

(10) Robledo, L., Soler, A.: "Luminous efficacy of global solar radiation for clear skies", *Energy Conversion and Management,* Vol. 41 (2000), pp. 1769-1779. doi:10.1016/S0196-8904(00)00019-4.

(11) Olseth, J. A., Skartveit, A.: "Observed and modelled hourly luminous efficacies under arbitrary cloudiness", *Solar Energy* Vol. 42 nº3 (1989), pp. 221-233. doi:10.1016/0038-092X(89)90014-5.

(12) Muneer, T., Gul, M. S., Kinghorn, D.: "Development of a meteorological illuminance model for daylight computations", *Applied Energy* Vol. 59 nº4 (1998), pp. 235-260. doi:10.1016/S0306-2619(98)00008-7.

(13) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R.: "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance", *Solar Energy* Vol. 44 nº 5 (1990), pp. 271-289. doi:10.1016/0038-092X(90)90055-H.

(14) Vartiainen, E.: "A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements", *Renewable Energy* Vol. 20 (2000), pp. 265-277. doi:10.1016/S0960-1481(99)00115-9.

(15) Muneer, T., Gul, M. S., Kubie, J.: "Models for estimating solar radiation and illuminance from meteorological parameters", *Journal of Solar Energy Enginneering* Vol. 122 (2000), pp. 146-153. doi:10.1115/1.1313529.

(16) De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., Marinelli, V.: "Simplified correlations of global, direct and diffuse luminous efficacy on horizontal and vertical surfaces", *Energy and Buildings*, Vol. 40 nº11 (2008), pp. 1991-2001. doi:10.1016/j.enbuild.2008.04.018.

(17) De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., Marinelli, V. : "Calculating diffuse illuminance on vertical surfaces in different sky conditions", *Energy,* Vol. 33 nº11 (2008), pp. 1703-1710. doi:10.1016/j.energy.2008.05.009.

(18) Ruiz, E., Soler, A., Robledo, L.: "Assessment of Muneer's luminous efficacy models in Madrid and a proposal for new models based on his approach", *Journal of Solar Energy Engineering, Vol.* 123 nº 3 (2001), pp. 220-224. doi:10.1115/1.1385200.

(19) Muneer, T. *Solar radiation and daylight models*, Elsevier Butterworth-Heinemann, second ed., Oxford, 2004.

(20) Joshi, M., Sawhney, R. L., Buddhi, D.: "Estimation of luminous efficacy of daylight and exterior illuminance for composite climate of Indore city in Mid Western India", *Renewable Energy*, Vol. 32 (2007), pp. 1363-1378. doi:10.1016/j.renene.2006.06.003.

(21) Bartzokas, A., Darula, S., Kambezidis, H. D., Kittler, R.: "Sky luminance distribution in central Europe and the Mediterranean area during the winter period", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,* Vol. 65 (2003), pp. 113–119. doi:10.1016/S1364-6826(02)00283-3.

(22) Bartzokas, A., Kambezidis, H. D., Darula, S., Kittler, R.: "Comparison between winter and summer sky-luminance distribution in Central Europe and in the Eastern Mediterranean", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 67 (2005), pp. 709-718. doi:10.1016/j.jastp.2004.12.008.

(23) Markou, M. T., Bartzokas, A., Kambezidis, H. D.: "Daylight climatology in Athens, Greece: types of diurnal variation of illuminance levels", *International Journal of Climatology*, Vol. 29 nº 14 (2009), pp. 2137-2145. doi: 10.1002/joc.1854.

(24) Pérez-Burgos, A., De Miguel, A., Bilbao, J.: "Daylight illuminance on horizontal and vertical surfaces for clear skies. Case study of shaded surfaces", *Solar Energy*, Vol. 84 (2010), pp. 137-143. doi:10.1016/j.solener.2009.10.019.

(25) Soler, A., Gopinathan, K., Robledo, L., Ruiz, E.: "Month-hour distributions of zenith luminance and diffuse illuminance in Madrid", *Energy Conversion and Management*, Vol. 45 nº 7-8 (2004), pp. 1141-1152. doi:10.1016/j.enconman.2003.08.010.

(26) Iqbal, M. *An introduction to solar radiation*, Academic Press, Toronto, Canada, 1983.

(27) Perez, R., Stewart, R., Arbogast, C., Seals, R., Scott, JJ.: “An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces. Description performance validation, site dependency evaluation”, *Solar Energy*, Vol. 36 (1986), pp. 481-498. doi:10.1016/0038-092X(86)90013-7.

(28) Perez, R., Seals, R., Ineichen, R., Stewart, R., Menicucci, D.: “A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces”, *Solar Energy*, Vol. 39 (1987), pp. 221-231. doi:10.1016/S0038-092X(87)80031-2.

(29) Robledo, L., Soler, A.: “Modeling irradiance on inclined planes with an anisotropic model”, *Energy*, Vol. 23 nº 3 (1998), pp. 193-201. doi:10.1016/S0360-5442(97)00083-2.

(30) Illuminating Engineering Society of North America, The *IESNA Lighting Handbook, Reference&Application,* ninth edition, New York, USA, 2000.

(31) Lynes, J.A.: “A sequence for daylighting” *Lighting, Research and Technology*, Vol. 11 nº 2 (1979), pp. 102-106.

(32) Comisión Internationale de L’Eclairage (CIE), *Daylight*. *International recommendations for the calculation of natural daylight*, Publicación Nº 16 (E-3.2) París, 1970.

(33) Comission of the Europen Communities, Directorate-Generale XII for Science, Research and Development. *Daylighting in Architecture. A European Reference Book*, James & James (Science Publishers) Ltd, London, UK, 1993.

(34) Yañez, G. Arquitectura solar e iluminación natural. Conceptos, métodos y ejemplos, Editorial Munilla-Lería, Madrid, 2008.

APÉNDICE

Irradiancia difusa (W/m^2) media horaria mensual en superficie horizontal para el periodo 1980-2005, en Madrid.

Hora solar	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene					55	88	114	125	123	113	90	56				
Feb				39	82	121	148	163	164	152	123	86	40			
Mar			32	74	116	156	181	195	198	185	161	124	78	34		
Abr			58	108	153	188	218	233	238	227	202	165	117	61		
May		36	86	133	174	212	238	252	257	244	220	186	138	88	36	
Jun		47	91	126	155	179	193	207	214	211	196	172	135	97	48	
Jul		41	83	115	138	154	166	175	177	173	166	150	123	86	39	
Ago		28	68	107	135	155	171	181	183	179	167	144	109	66	26	
Sep			38	83	121	147	166	180	182	173	152	122	84	37		
Oct				49	92	128	157	169	170	159	133	96	51			
Nov				27	61	96	120	134	134	123	98	63	26			
Dic					45	80	107	118	118	105	81	47				

CUADERNO



Cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com

